

تعیین صفحه اصلی گسل زمین‌لرزه‌های ۲۱ مرداد ۱۳۹۱ اهر-ورزقان به روش H-C

فریده سادات میردامادی^۱ و مهدی رضاپور^{۲*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

۲. دانشیار، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۹۳/۷/۲۲، پذیرش نهایی: ۹۴/۳/۱۲)

چکیده

در حل سازوکار چشمه زمین‌لرزه دو صفحه اصلی و کمکی مشخص می‌شوند. اثبات اینکه کدام صفحه واقعاً صفحه شکست است، رویای زلزله‌شناسان است. دانش شناخت این صفحات کمک بسیاری به درک مدل ژئودینامیکی و میدان تنش در مقیاس منطقه‌ای می‌کند. در این پژوهش، به بررسی سازوکار کانونی دو زمین‌لرزه متوالی رخ داده در ۱۱ آگوست ۲۰۱۲ میلادی برابر با ۲۱ مرداد ۱۳۹۱ شمسی در شمال غربی اهر و شمال شرقی ورزقان و سه پس‌لرزه بزرگ می‌پردازیم. در این تحقیق از روش هندسی H-C (Hypocenter-Centroid) برای تعیین صفحه اصلی گسل استفاده می‌شود که با به‌دست‌آوردن حل تانسور ممان مرکزوار و کانون زمین‌لرزه، قابل اجراست. با استفاده از لرزه‌نگاشت‌های ثبت‌شده در ایستگاه‌های باند پهن پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، مرکز لرزه‌نگاری کشوری و مرکز لرزه‌نگاری جمهوری آذربایجان و وارون‌سازی تانسور ممان لرزه‌ای در حوزه زمان، پارامترهای چشمه برای این رویدادها تعیین شد که با توجه به بهره‌گیری از داده‌های محلی و منطقه‌ای و محاسبه توابع گرین الاستودینامیک برای این فواصل، دقت بیشتری در تعیین پارامترهای چشمه زمین‌لرزه در مقایسه با روش‌های دورلرزه‌ای دارد. با توجه به نتایج این پژوهش، گسل جنوب اهر با راستای شرقی-غربی و با سازوکار امتدادلغز راست‌گرد مسبب زمین‌لرزه‌های اخیر است. نتایج به‌دست‌آمده با پارامترهای منتشرشده توسط مراکز زلزله‌شناسی داخلی و خارجی برای زمین‌لرزه‌های اهر-ورزقان مقایسه شد که هم‌خوانی نسبتاً خوبی مشاهده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: روش هندسی H-C، زمین‌لرزه اهر-ورزقان، سازوکار کانونی، صفحه اصلی گسل

۱. مقدمه

در گستره آذربایجان از لحاظ ساختاری، گسل‌های شاخص و مهمی فعال هستند که از دیدگاه لرزه‌زمین‌ساختی حائز اهمیت‌اند. علی‌رغم وسعت اندک این بخش در مقایسه با دیگر بخش‌های ایران از لحاظ روندهای ساختاری، پیچیدگی‌های خاصی در آن دیده می‌شود و روندهای متفاوت N-S، NW-SE و NE-SW و گاهی E-W در آن شناخته‌شده هستند که مشکلات بسیاری را در تعبیر و تفسیر تکتونیکی این بخش از پوسته ایران ایجاد کرده است.

وضعیت گسل‌های اصلی و فعال در شمال غرب کشور و توانایی لرزه‌زایی این گسل‌ها با توجه به سابقه لرزه‌خیزی در این منطقه اهمیت مطالعه آن‌ها را دوچندان می‌کند. این منطقه به عنوان بخشی از یک سیستم فعال تکتونیکی، حاصل برهم‌کنش صفحات آناتولی، عربستان و اوراسیاست. حاصل این برهم‌کنش به‌وجود آمدن پهنه

زاگرس، منطقه تالش و آذربایجان است که ادامه آن را می‌توان در شرق ترکیه مشاهده کرد (جکسون، ۱۹۹۲). دو گسل مهم این منطقه، گسل شمال تبریز و گسل آستارا (تالش) به همراه گسل‌های فرعی دیگر مانند گسل تالش، گسل‌های جنوب و شمال بزگوش، گسل صوفیان، گسل میشو، گسل تسوج و گسل جنوب اهر است. سازوکار غالب گسل‌های این ناحیه از نوع امتدادلغز و یا معکوس است که با توجه به نیروهای فشارشی از سمت صفحه عربستان به این منطقه قابل درک است. مشاهده‌ها نرخ همگرایی ۲۰ میلی‌متر در سال را در منطقه گسلی تبریز نشان می‌دهد که حاصل حرکت صفحه عربستان نسبت به صفحه اوراسیاست. (ورنانت و همکاران، ۲۰۰۴).

در ۲۱ مرداد ۱۳۹۱ زمین‌لرزه‌های متوالی با بزرگی گشتاوری ۶/۴ و ۶/۲ در نزدیکی شهر اهر، شمال غرب ایران رخ داد. این دو رویداد موجب گسیختگی سطحی ۱۲ کیلومتری شدند. این ناحیه لرزه‌خیزی تاریخی و

جدید بسیار پراکنده‌ای دارد. منطقه گذار بین دو حوزه تکتونیکی متفاوت، رفتاری شامل فشارش در ایران و کشش در صفحه آنا تولی و روراندگی در زیر قفقاز را از خود نشان می‌دهند. زمین‌لرزه‌های متوالی اطلاعاتی در مورد مکانیسم گسل، شامل دگرشکلی همزمان گسل‌های موازی با گسل اصلی و برش‌های شعاعی را به وجود می‌آورد. این رویداد در یک گسل بسیار ناشناخته که گسل اهر نامیده می‌شود، رخ داد. دو زمین‌لرزه متوالی اهر-ورزقان ثابت کرد که گسل‌های فعال ناشناخته‌ای در شمال گسل شمال تبریز وجود دارد (دونر و همکاران، ۲۰۱۵).

در این پژوهش به بررسی و تحلیل داده‌های دو زمین‌لرزه متوالی اهر-ورزقان، اولی با بزرگی گشتاوری ۶/۴ و دومی با بزرگی گشتاوری ۶/۲ و سه پس‌لرزه رخ داده با بزرگی گشتاوری $M_w \geq 5$ می‌پردازیم. زمین‌لرزه‌ها در محدوده طول جغرافیایی ۳۹-۳۷/۵ درجه شمالی و عرض جغرافیایی ۴۵-۴۸ درجه شرقی واقع شده‌اند. شکل ۱ محدوده منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. به منظور پردازش داده‌ها و وارون‌سازی شکل موج از روش سه‌بعدی نرم‌افزار ایزولا استفاده شده و ابتدا پارامترهای چشمه تعیین می‌شود. سپس با استفاده از روش هندسی H-C صفحه اصلی گسل مسبب دو زمین‌لرزه متوالی و سه پس‌لرزه با بزرگی بیشتر از ۵ تعیین می‌شود.

۲. روش تحقیق

روش‌های موجود برای تعیین صفحه گسل با استفاده از اطلاعات لرزه‌نگاشت‌ها، بیشتر بر مدل‌های چشمه گسترده استوار است. در این گونه مطالعات، الگوی گسترش لغزش (مقدار لغزش در هر نقطه از صفحه گسل) برای هر دو صفحه گسل تعیین می‌شود و صفحه‌ای که بهترین برازش را با داده‌ها داشته باشد، صفحه اصلی گسل شناخته می‌شود. هنگامی که یک ایستگاه نزدیک به گسل داشته باشیم، این روش را می‌توان با تعداد کمی از ایستگاه‌ها نیز به کار برد (دلویس و لگراند، ۱۹۹۹).

در موارد زیادی نتیجه استفاده از هر کدام از صفحات، تنها تفاوت بسیار کوچکی در بهینه‌سازی هماهنگی شکل موج مصنوعی و واقعی دارد، بنابراین همچنان تعیین یکی از دو صفحه به عنوان صفحه اصلی گسل کار مشکلی است (روملیوتی و همکاران، ۲۰۰۴). یکی دیگر از روش‌های تعیین صفحه گسلش، محاسبه مراتب بالاتر تانسور ممان برای هر دو صفحه و مقایسه مقدار بهینه‌شدن همبستگی بین لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی و مشاهده‌ای برای هر دو صفحه است. مزیت این روش این است که در آن به مدل‌سازی گسترش لغزش نیازی نیست و قابلیت به کارگیری روی زمین‌لرزه‌های کوچک را نیز دارد.

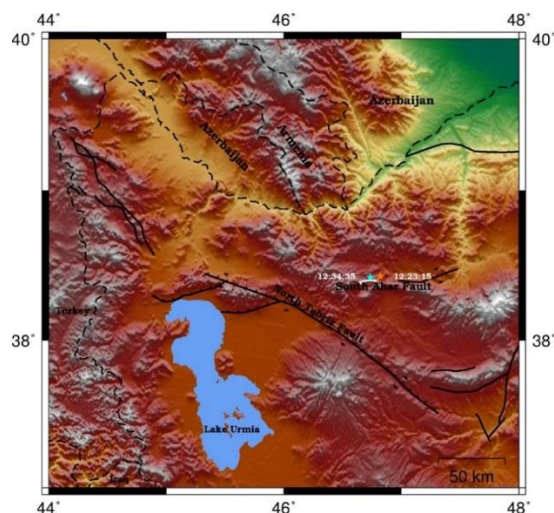
یکی از روش‌هایی که از دو روش گفته‌شده جدیدتر است، بر پایه پیمایش چشمه (Source Scanning) قرار گرفته است (کائو و شان، ۲۰۰۷). در این روش نیازی به حل تانسور ممان نیست، اما باید لرزه‌نگاشت‌هایی نزدیک به رومرکز داشته باشیم که در آن امواج از نوع S و P به وضوح (جدا از هم) قابل تشخیص باشند.

از دیگر روش‌های تعیین صفحه گسل، بررسی تابع زمانی و الگوی تشعشع امواج لرزه‌ای در ایستگاه‌هایی است که در آزمون‌های مختلف نسبت به چشمه زمین‌لرزه قرار گرفته‌اند. این روش برای زمین‌لرزه‌هایی که شکستگی در آن‌ها یک‌طرفه است، کاربرد دارد و برای ایستگاه‌هایی که در جهت گسیختگی قرار می‌گیرند، شاهد دامنه بزرگ‌تر و جمع‌شدگی بیشتری روی شکل موج هستیم؛ هرچند که مساحت زیر تابع زمانی چشمه، مشخص‌کننده ممان‌لرزه‌ای (M_0) مستقل از آزمون ایستگاه دریافت‌کننده است؛ بنابراین با استفاده از الگوی تشعشع امواج لرزه‌ای می‌توان در زمین‌لرزه‌هایی که شکستگی آن‌ها یک‌طرفه است، به راستای گسیختگی پی برد (لی و والاس، ۱۹۹۵).

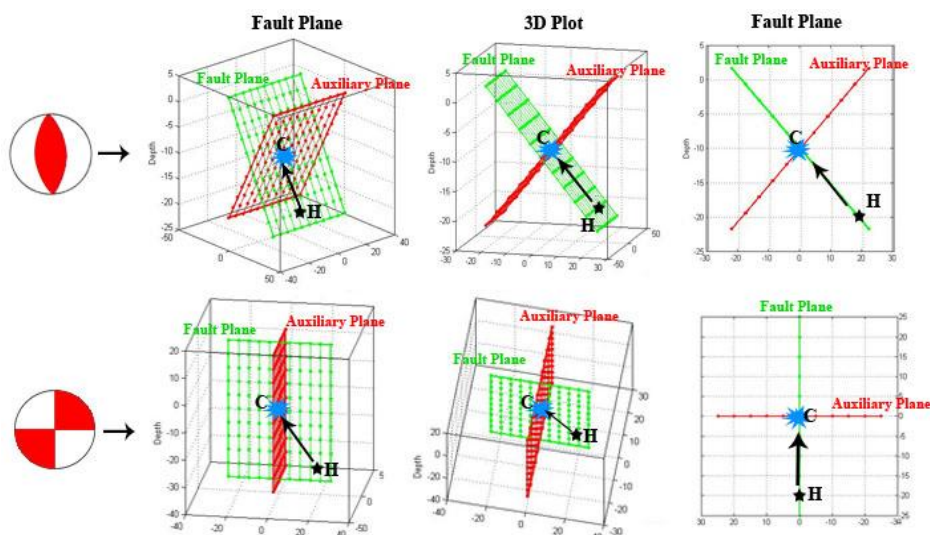
روش H-C روشی ساده و جدید است که در صورت در دسترس بودن حل تانسور ممان مرکوزوار و کانون زمین‌لرزه، به سرعت قابل اجراست. در روش‌های تعیین محل زمین‌لرزه، بر اساس زمان سیر امواج لرزه‌ای، مکان

توجه به تعیین عناصر تانسور ممان، برای حالت دو زوج نیرو، می‌توان مقادیر بردارهای شیب، راستا و لغزش دو صفحه اصلی و کمکی را که از C عبور می‌کنند، تعیین کرد. اکنون اگر فرض کنیم که صفحه گسل مسطح است، صفحه گسل شامل نقطه آغاز شکستگی، H و نقطه C است (شکل ۲).

شروع گسیختگی یا در اصطلاح کانون زمین‌لرزه تعیین می‌شود. بنابراین این مکان را متناظر با نقطه آغاز شکستگی (H) در نظر می‌گیرند. اما حل CMT که از مدل‌سازی امواج دوره‌بلند به دست می‌آید، تقریب نقطه‌ای مکانی است که بیشترین لغزش را روی سطح گسل داشته است (C). علاوه بر این در حل CMT، با



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه، خطوط سیاه‌رنگ نشان‌دهنده گسل‌های فعال در منطقه هستند. خط سفیدرنگ شکستگی سطحی حدود ۱۲ کیلومتری مشاهده شده توسط فریدی و سرتیپی (۲۰۱۲) را نشان می‌دهد. ستاره‌های نارنجی و آبی به ترتیب مکان زمین‌لرزه‌های اول و دوم را مشخص می‌کنند که زمان وقوع آن‌ها به وقت UTC روی شکل مشخص شده است.



شکل ۲. تصویر سه‌بعدی دو سازوکار که از سه زاویه مختلف نشان داده شده‌اند؛ در شکل‌های دو ستون اول محور عمودی نشان‌دهنده عمق زمین‌لرزه و دو محور دیگر نشان‌دهنده طول و عرض جغرافیایی هستند. ردیف بالا تصویر سه‌بعدی از سازوکار معکوس است، مکان مرکزوار (C) محل قرارگیری دو صفحه عمود بر هم است. مکان آغاز شکستگی (H)، روی صفحه سبز قرار گرفته است و بنابراین صفحه سبز رنگ صفحه گسل است. تصویر بالا سمت راست سازوکار و مکان شروع گسیختگی را از مقطع کناری نشان می‌دهد و بنابراین محور عمودی، نشان‌دهنده عمق و محور افقی نشان‌دهنده طول یا عرض جغرافیایی است. ردیف پایین، تصویر سه‌بعدی از سازوکار امتداد لغز است که با توجه به محل قرارگیری C و H، صفحه سبز رنگ صفحه گسل است. تصویر پایین سمت راست سازوکار و مکان شروع گسیختگی را از بالا نشان می‌دهد و بنابراین محورهای عمودی و افقی نشان‌دهنده طول و عرض جغرافیایی است.

جدول ۱. مختصات ایستگاه‌های لرزه‌نگاری که به منظور تعیین محل زمین‌لرزه‌ها و همچنین وارون‌سازی شکل موج در این پژوهش استفاده شده‌اند.

Station Name	Agency	Code	Lat (N ⁰)	Lon (E ⁰)	Elevation (m)
Maku	IIEES	MAKU	39.355	44.683	1730
Sanandaj	IIEES	SNGE	35.093	47.347	1940
Zanjan	IIEES	ZNJK	36.670	48.685	2200
Astara	RCSS ANAS	AST	38.560	48.791	148
Jelilabad	RCSS ANAS	GLB	39.242	48.392	140
Ordubad	RCSS ANAS	ORB	38.928	45.994	945
Lankaran	RCSS ANAS	LKR	38.710	48.780	-18
Lerik	RCSS ANAS	LRK	38.643	48.340	1592
Nakhchivan	RCSS ANAS	NAX	39.174	45.495	920
Shahbuz	RCSS ANAS	SBZ	39.397	45.553	1202
Azarshahr	IRSC	AZR	37.677	45.983	2270
Sarab	IRSC	SRB	37.823	47.668	2020
Shabestar	IRSC	SHB	38.283	45.617	2298
Marand	IRSC	MRD	38.713	45.703	2150
Heris	IRSC	HRS	38.317	47.043	2112
Tabriz	IRSC	TBZ	38.233	46.133	1430
Komasi	IRSC	KOM	34.176	47.5144	1502
Bozab	IRSC	BZA	34.469	47.8605	2343
Qazvin	IRSC	QAB	35.708	49.58238	2100

۳. پردازش داده

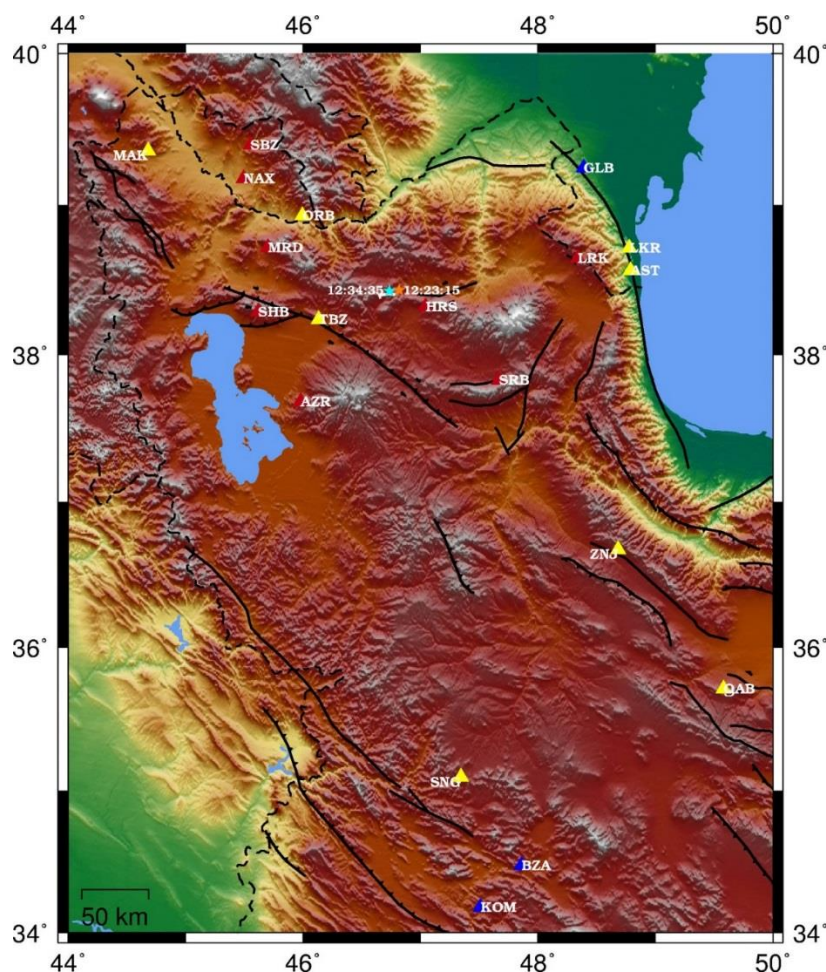
برای محاسبه توابع گرین و به منظور بهبود نتایج، مدل سرعتی مورد استفاده پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، مدل سرعتی مورد استفاده مرکز لرزه‌نگاری کشور وابسته به مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و مدل سرعتی منطقه تبریز (مرادی و همکاران، ۲۰۱۱) در این پژوهش استفاده شد. با مقایسه نتایج، سازگارترین مدل با منطقه جهت پردازش نهایی، مدل سرعتی پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله انتخاب شد (جدول ۲). همچنین در جدول ۳ اطلاعات مربوط به تعیین مکان مجدد دو زمین‌لرزه متوالی و سه پس‌لرزه استفاده‌شده در این مطالعه درج شده است.

در این پژوهش از داده‌های ثبت‌شده در ایستگاه‌های باند پهن پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (IIEES)، مرکز لرزه‌نگاری کشوری وابسته به مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (IRSC) و مرکز لرزه‌نگاری جمهوری آذربایجان (RCSS ANAS)، به منظور پوشش ایستگاهی مناسب و برای تعیین مکان مجدد توسط برنامه Hypocenter (لینرت و همکاران، ۱۹۸۶؛ لینرت و هاسکو، ۱۹۹۵)، وارون‌سازی شکل‌موج و حل CMT استفاده شده است. مختصات این ایستگاه‌ها در جدول ۱ درج و موقعیت آن‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است.

مرکزوار مربوط به زمین‌لرزه‌ها به‌دست می‌آید. در مرحله اول جستجوی شبکه‌ای، در زیر موقعیت رومرکز به‌دست آمده، ۷ چشمه به صورت عمودی و با فاصله ۱ کیلومتر از یکدیگر برای اعماق ۲ تا ۸ کیلومتر قرار گرفتند. عمق بهینه مرکزوار در این مرحله به‌دست آمد. در عمق بهینه ۴ کیلومتری، دارای بیشترین مقدار بازه‌انشار واریانس (Variance Reduction)، شبکه افقی شامل ۴۹ نقطه با فواصل ۱۰ کیلومتر از یکدیگر قرار دادیم و به جستجوی مکان مرکزوار پرداختیم. در مرحله نهایی و به منظور جستجوی دقیق مکان مرکزوار، در عمق ۴ کیلومتر و در محدوده‌ای که دارای همبستگی بیشتری است، شبکه افقی شامل ۷۲ نقطه با فواصل ۱ کیلومتر از یکدیگر را قرار دادیم.

خطای مکانی (افقی و قائم) تعیین محل مجدد برای زمین‌لرزه‌های اول و دوم به ترتیب برابر با $ERH=1.3km$ ، $ERZ=1.41km$ ، $ERH=1.0km$ و $ERZ=1.24km$ است.

در این مطالعه جهت بررسی زمین‌لرزه ۱۱ آگوست ۲۰۱۱ با بزرگی $M_w = 6.4$ در ساعت ۱۲:۲۳:۱۵ استفاده از نرم‌افزار ایزولا و روش هندسی H-C و با مدل‌سازی کامل شکل‌موج، گسل مسبب زمین‌لرزه شناسایی می‌شود. استفاده از داده‌های محلی و منطقه‌ای باعث می‌شود تا جزئیات بیشتری در هنگام مدل‌سازی به دست آوریم. در این روش سعی می‌شود با تعیین دقیق موقعیت نقطه کانونی (H) و مرکزوار (C)، صفحه گسل تعیین شود و در سه مرحله، سازوکار کانونی و مکان



شکل ۳. موقعیت مکانی ایستگاه‌های لرزه‌نگاری که به منظور تعیین محل زمین‌لرزه‌ها و همچنین وارون‌سازی شکل موج در این پژوهش استفاده شده‌اند. ایستگاه‌هایی که با رنگ قرمز مشخص شده‌اند، تنها در مکان‌یابی زمین‌لرزه‌ها استفاده شده‌اند. ایستگاه‌هایی که با رنگ آبی نشان داده شده‌اند، تنها در وارون‌سازی شکل موج و ایستگاه‌هایی با رنگ زرد در مکان‌یابی و وارون‌سازی شکل موج استفاده شده‌اند. ستاره‌های نارنجی و آبی به ترتیب مکان زمین‌لرزه‌های اول و دوم را مشخص می‌کنند که زمان وقوع آن‌ها به وقت UTC روی شکل مشخص شده است.

جدول ۲. مدل سرعتی مورد استفاده پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

Depth (km)	Vp (km/s)	Vs (km/s)	Density (gr/cm3)
0	5.40	3.034	2.78
6	5.90	3.315	2.88
14	6.30	3.539	2.96
18	6.50	3.652	3.00
46	8.05	4.522	3.31
72	8.10	4.551	3.32

جدول ۳. پارامترهای تعیین مکان مجدد برای زمین‌لرزه‌های متوالی اهر-ورزقان و پس‌لرزه‌های با بزرگی بیشتر از ۵ که در این پژوهش تعیین شده است.

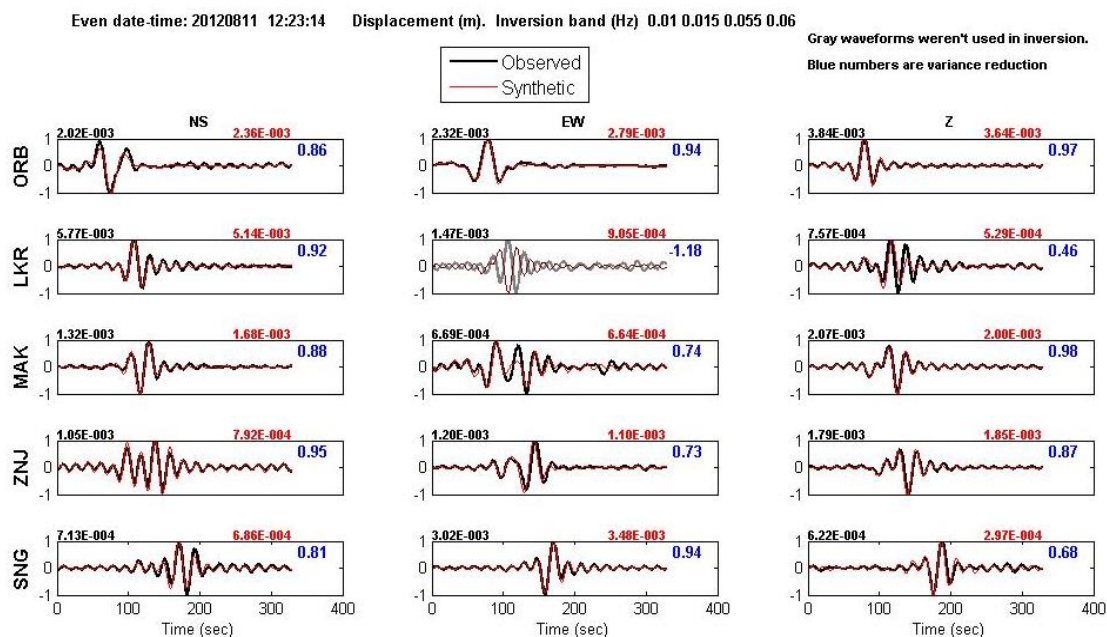
Date	Time (UTC)	Lat (°)	Lon (°)	Depth (km)	Mw
2012/08/11	12:23:15	38.43	46.82	10.64	6.4
2012/08/11	12:34:35	38.422	46.735	13.2	6.2
2012/08/14	14:02:25	38.49	46.79	5.21	5.0
2012/08/15	17:49:05	38.412	46.641	8.5	5.0
2012/11/07	6:26:30	38.48	46.57	14.1	5.5

کمتری بود، این مؤلفه ایستگاه از وارون‌سازی حذف شد. درصد دو زوج نیرو و شیفت زمانی نسبت به زمان وقوع برای رویداد مورد بحث (زمین‌لرزه اول) در شکل ۵ نشان داده شده است. نتایج حاصل از مرحله نهایی جستجوی شبکه‌ای جهت مقایسه با گزارش مراکز مختلف زلزله‌شناسی در جدول ۴ و شکل ۶ آورده شده است.

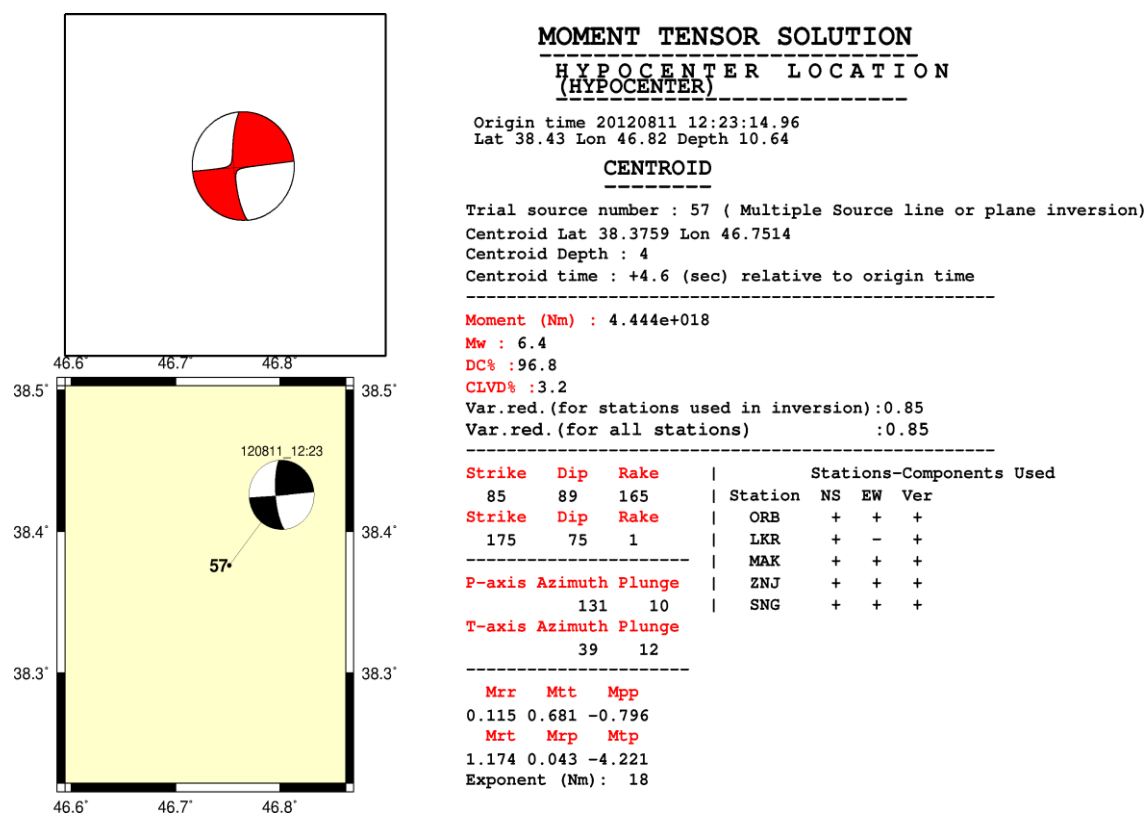
در تمام مراحل وارون‌سازی از محدوده فرکانسی ۰/۰۱۵ تا ۰/۰۵۵ هرتز استفاده شد. شکل ۴ مقدار تطابق شکل‌موج‌های مشاهده‌ای و مصنوعی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است نگاشت‌های مشاهده‌شده و مصنوعی برای بیشتر مؤلفه‌های ایستگاه‌ها هم‌خوانی خوبی دارد؛ به دلیل اینکه هم‌خوانی شکل‌موج‌ها برای مؤلفه E ایستگاه LKR دارای تطابق

جدول ۴. مقایسه نتایج مرکزوار به‌دست‌آمده در این پژوهش و گزارش‌های مختلف مربوط به زمین‌لرزه ۱۱ آگوست ۲۰۱۲ رخ‌داده در ساعت ۱۲:۲۳:۱۵ به وقت UTC.

Date and Time (UTC)	Agency	Lat, Lon (°)	Str1, Dip1, Rak1 (°)	Str2, Dip2, Rak2 (°)	Depth (km)	Mw	DC %	Var. Red. %
2012/08/11	CMT	38.3100, 46.8000	175, 81, 6	84, 84, 170	15	6.5	-	-
	USGS	38.3780, 47.1280	180, 67, 12	86, 79, 157	11	6.4	-	-
12:23:15	IGUT	38.4150, 46.7890	267, 81, -175	176, 85, -9	8	6.5	70.1	-
	This Study	38.3759, 46.7514	85, 89, 165	175, 75, 1	4	6.4	96.8	85



شکل ۴. مقایسه شکل موج‌های مشاهده‌ای در ایستگاه‌ها و شکل موج‌های مصنوعی تولیدشده برای زمین‌لرزه اول رخ داده در ۱۱ آگوست ۲۰۱۲ و ساعت ۱۲:۲۳:۱۵ UTC. عدد آبی در بالای مؤلفه هر ایستگاه نشان‌دهنده بازه‌ی واریانس است. مؤلفه‌ای که به رنگ طوسی نشان داده شده، از وارون‌سازی حذف شده است.



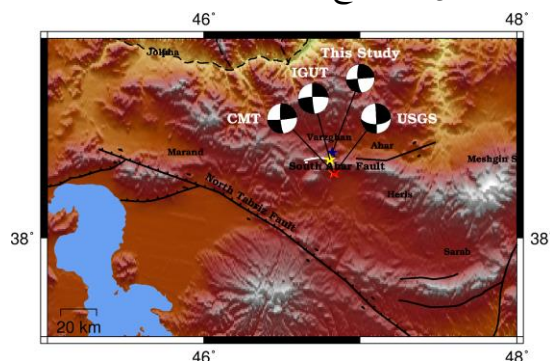
شکل ۵. خروجی نهایی حل CMT برای زمین‌لرزه رخ داده در ۱۱ آگوست ۲۰۱۲ در ساعت ۱۲:۲۳:۱۵ به وقت UTC. در شکل، سازوکار زمین‌لرزه، در صد دو زوج نیروی تانسور ممان و همچنین مقدار بازه‌ی واریانس نشان داده شده است. با توجه به محل مرکزوار، فاصله میان کانون و مرکزوار ۱۱ کیلومتر است.

سازوکار کانونی به‌دست‌آمده در این مطالعه از نوع امتدادلغز است که هم‌خوانی خوبی با سازوکار به‌دست‌آمده از پروژه جهانی CMT دارد. با استفاده از روش H-C (زاهدانیک و همکاران، ۲۰۰۸)، و با رسم سه‌بعدی سازوکار کانونی به‌دست‌آمده، با توجه به قرارگیری نقاط H و C روی صفحه اصلی گسل، مشخص می‌شود که صفحه‌ای با راستای ۸۵ درجه و شیب ۸۹ درجه، صفحه اصلی گسل است (شکل ۷).

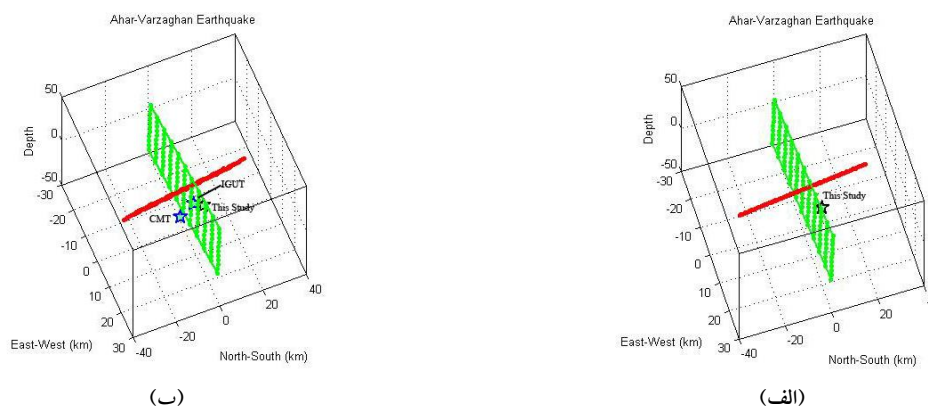
پس از پیدا کردن پارامترهای چشمه، به مطالعه پیچیدگی چشمه این زمین‌لرزه می‌پردازیم. برای این امر جستجوی دو چشمه روی صفحه اصلی گسل مسبب زمین‌لرزه بررسی شد. برای جستجوی دو زیررخداد روی صفحه اصلی گسل، یک شبکه شامل ۷ نقطه با فواصل ۱۰ کیلومتری در راستای امتداد و ۸ نقطه با فاصله ۲ کیلومتری در جهت شیب در نظر گرفته شد (شکل ۸).

جستجوی دو چشمه روی صفحه اصلی گسل در جدول ۵ آورده شده است.

با توجه به نتایج، مقدار افزایش پارامتر بازهانش واریانس، با در نظر گرفتن دو زیر رخداد، قابل ملاحظه است (تقریباً ۰/۰۸). با حذف تک‌تک ایستگاه‌ها و تغییر دسته داده‌ها، زمین‌لرزه اول اهر-ورزقان برای تعیین آزمایش عدم قطعیت تجزیه و تحلیل شد؛ سازوکار کانونی برای زیررخدادهای ۱ و ۲ که در ۶ مرحله، هر بار با حذف داده‌های مربوط به یکی از ایستگاه‌ها به دست آمد، تقریباً یکسان بود (شکل ۹). بنابراین می‌توان زمین‌لرزه اول را که در ۲۱ مرداد ۱۳۹۱ ساعت ۱۲:۲۳:۱۵ به وقت UTC رخ داده است، با دو زیر رخداد در نظر گرفت. در شکل ۱۰ مکان مرکزوار هر دو زیر رویداد مشخص شده است و با توجه به نتایج به‌دست‌آمده برای زمین‌لرزه اول، راستای گسیخت گسل از شرق به غرب است.



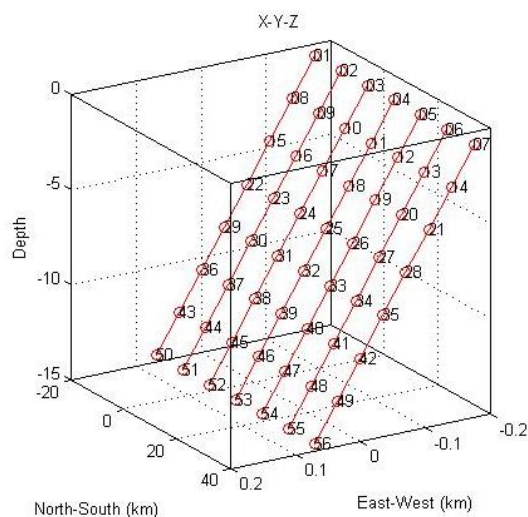
شکل ۶. نتایج حل سازوکار زمین‌لرزه ۱۱ آگوست ۲۰۱۲ در ساعت ۱۲:۲۳:۱۵ به وقت UTC در این پژوهش و گزارش مراکز مختلف زلزله‌شناسی. خط سفید رنگ شکستگی سطحی حدود ۱۲ کیلومتری مشاهده‌شده توسط فریدی و سرتیپی (۲۰۱۲) را نشان می‌دهد.



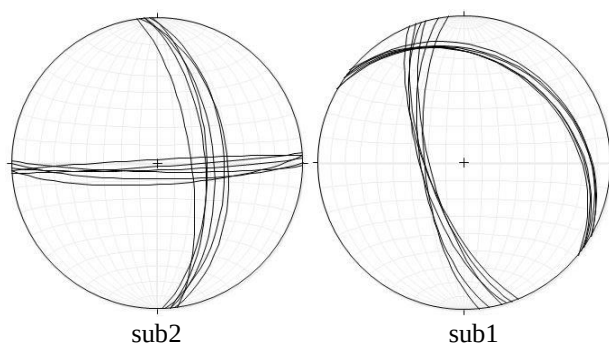
شکل ۷. علامت ستاره در شکل نشان‌دهنده مکان کانون زمین‌لرزه (H) و محل برخورد دو صفحه نشان‌دهنده مکان مرکزوار (C) است. صفحه‌ای که از نقاط H و C عبور کند، صفحه اصلی گسل شناخته می‌شود. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، صفحه سبز رنگ را می‌توان صفحه اصلی گسل در نظر گرفت. (الف) نمایش صفحه گسل با راستای ۸۵ درجه و شیب ۸۹ درجه در این مطالعه. (ب) نمایش صفحه گسل با استفاده از نتایج مراکز USGS و CMT و نتایج به‌دست‌آمده در این مطالعه.

جدول ۵. نتایج به‌دست‌آمده از وارون‌سازی با در نظر گرفتن دو زیررخداد برای زمین‌لرزه رخ داده در ۱۱ آگوست ۲۰۱۲، در ساعت ۱۲:۲۳:۱۵ به وقت UTC، در این پژوهش.

Number of Subevent	Str1, Dip1, Rak1 (°)	Str2, Dip2, Rak2 (°)	Lat, Lon (°)	Time Shift (sec)	M0	DC%	Var. Red %
1	355, 58, -5	88, 86, -148	38.4233, 46.7058	+4.2	5.108 e+18	44.0	80
2	163, 66, 108	305, 30, 56	38.4066, 46.4778	+8.0	2.911 e+18	59.2	88



شکل ۸. نمایش چیدمان چشمه‌ها روی صفحه اصلی گسل به منظور بررسی پیچیدگی زمین‌لرزه ۱۱ آگوست ۲۰۱۲ در ساعت ۱۲:۲۳:۱۵ به وقت UTC.



شکل ۹. سازوکار کانونی به‌دست‌آمده برای هر دو زیر رخداد با کاهش دسته داده‌ها (هر بار با حذف داده‌های مربوط به یک ایستگاه)، از پایداری خوبی برخوردارند.

زمان وقوع برای رویداد مورد بحث در شکل ۱۱ نشان داده شده است. نتایج مرحله نهایی جستجوی شبکه‌ای برای مقایسه با گزارش مراکز مختلف زلزله‌شناسی در جدول ۶ و شکل ۱۲ آورده شده است.

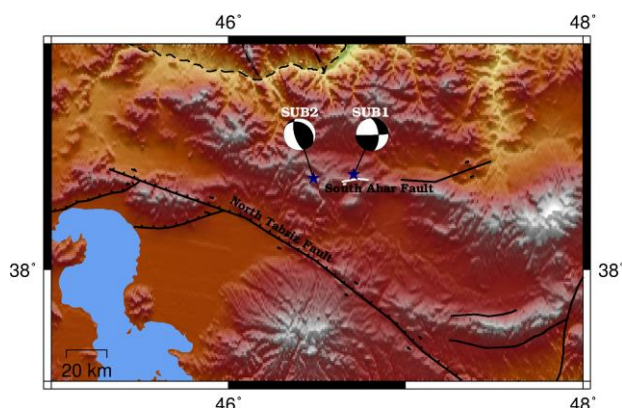
سازوکار کانونی به‌دست‌آمده در این مطالعه از نوع امتدادلغز با مؤلفه معکوس است که هم‌خوانی خوبی با سازوکار به‌دست‌آمده از پروژه جهانی CMT و USGS

زمین‌لرزه دوم با فاصله زمانی ۱۱ دقیقه از زمین‌لرزه اول رخ داد. برای این زمین‌لرزه نیز مانند زمین‌لرزه اول، در سه مرحله سازوکار کانونی و مکان مرکزوار مربوط به زمین‌لرزه‌ها به‌دست می‌آید. با تکرار مراحل قبل، عمق بهینه مرکزوار ۱۰ کیلومتر تعیین شد. در تمام مراحل وارون‌سازی از محدوده فرکانسی ۰/۰۱۵ تا ۰/۰۵۵ هرتز استفاده شد. درصد دو زوج نیرو و شیف‌ت زمانی نسبت به

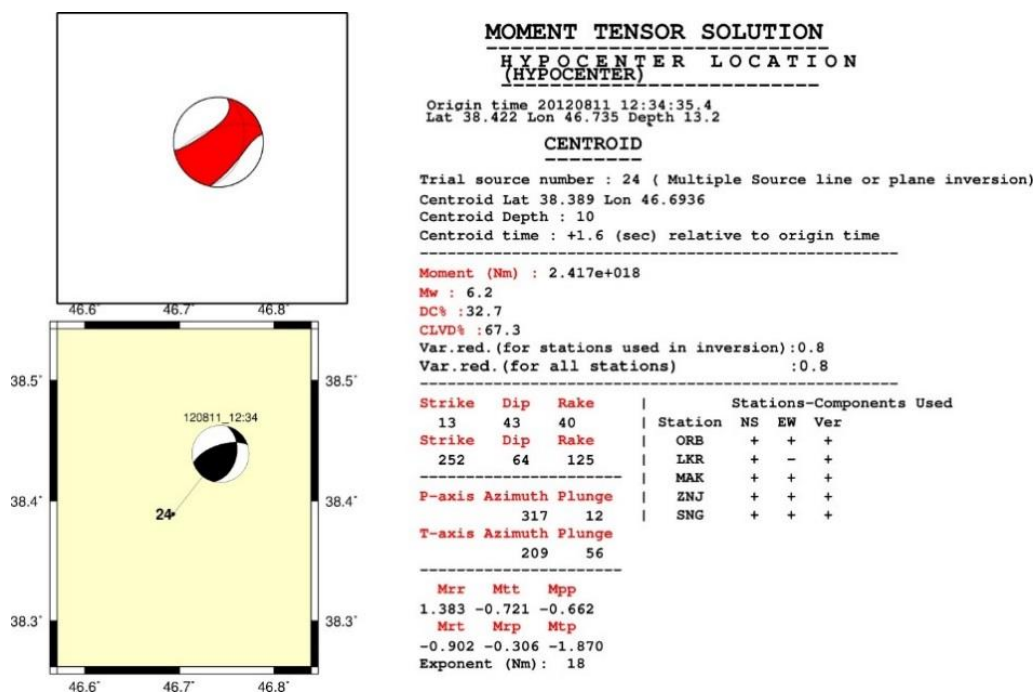
دارد. با استفاده از روش H-C (زاهرادنیک و همکاران، ۲۰۰۸) و با رسم سه بعدی سازوکار کانونی به دست آمده، با توجه به قرارگیری نقاط H و C روی صفحه اصلی گسل، مشخص می شود که صفحه ای با راستای ۲۵۲ درجه و شیب ۶۴ درجه، صفحه اصلی گسل است (شکل ۱۳).

پس از پیدا کردن پارامترهای چشمه، به مطالعه پیچیدگی چشمه این زمین لرزه می پردازیم. برای این امر جستجوی دو چشمه روی صفحه اصلی گسل مسبب

زمین لرزه بررسی شد. با توجه به عدم قطعیت زیررخداده ۲ (شکل ۱۴)، زمین لرزه دوم رخ داده در ۱۱ آگوست ۲۰۱۲ در ساعت ۱۲:۳۴:۳۵ به وقت UTC را می توان با یک چشمه با امتداد ۲۵۲ و شیب ۶۴ مدل سازی کرد. با توجه به بررسی ها، درصد بالای مؤلفه غیر دو زوج نیرو در حل تانسور ممان برای این چشمه ممکن است ناشی از وجود نویز در داده ها، مدل سرعتی یا خطاهای ناشی از محاسبه ها باشد.



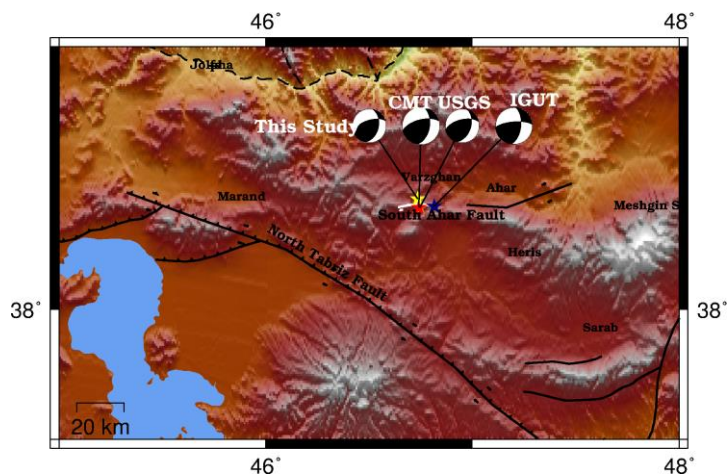
شکل ۱۰. مکان مرکزوار هر دو زیررویداد با ستاره مشخص شده است؛ راستای گسیخت گسل از شرق به غرب است. خط سفید رنگ شکستگی سطحی حدود ۱۲ کیلومتری مشاهده شده توسط فریدی و سرتیپی (۲۰۱۲) را نشان می دهد.



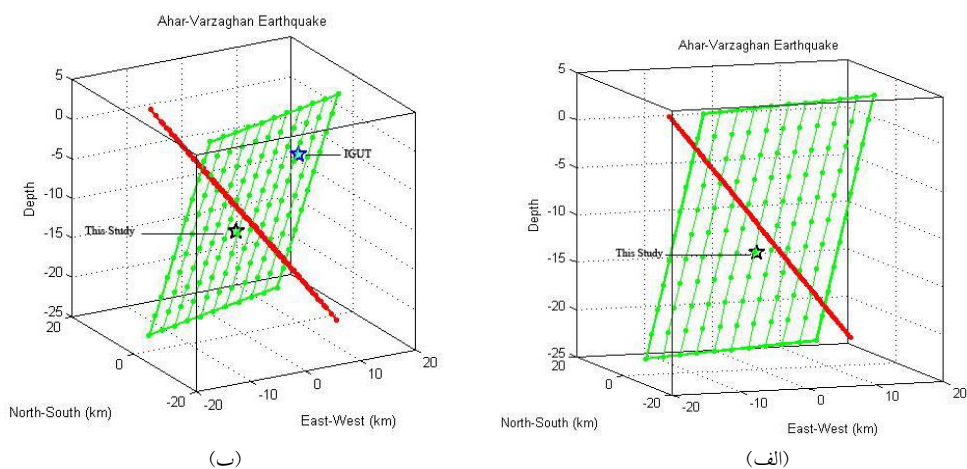
شکل ۱۱. خروجی نهایی حل CMT برای زمین لرزه رخ داده در ۱۱ آگوست ۲۰۱۲ در ساعت ۱۲:۳۴:۳۵ به وقت UTC. در شکل، سازوکار زمین لرزه، درصد دو زوج نیروی تانسور ممان و همچنین مقدار بازه از واریانس نشان داده شده است. با توجه به محل مرکزوار، فاصله میان کانون و مرکزوار ۶ کیلومتر است.

جدول ۶. مقایسه نتایج مرکزوار به‌دست‌آمده در این پژوهش و گزارش‌های مختلف مربوط به زمین‌لرزه دوم اهر-ورزقان که در ۱۱ آگوست ۲۰۱۲ ساعت ۱۲:۳۴:۳۵ به وقت UTC رخ داده است.

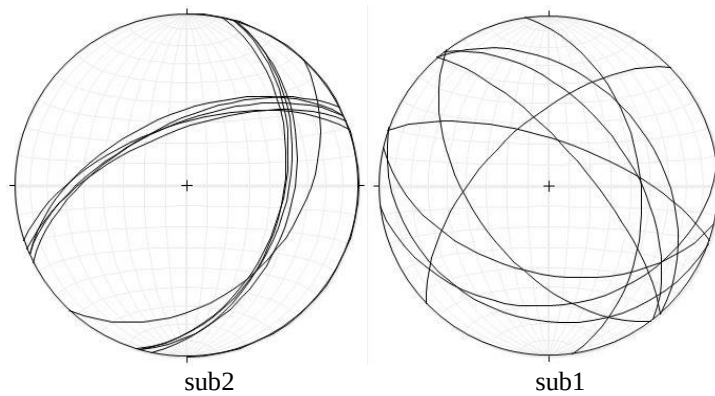
Date and Time (UTC)	Agency	Lat, Lon (°)	Str1, Dip1, Rak1 (°)	Str2, Dip2, Rak2 (°)	Depth (km)	Mw	DC %	Var. Red. %
2012/08/11	CMT	38.3500, 46.7800	10, 50, 36	255, 63, 134	19.2	6.4	-	-
	USGS	38.6230, 47.1410	19, 47, 43	256, 60, 127	11.0	6.2	-	-
12:34:35	IGUT	38.4230, 46.8350	7, 57, 21	256, 72, 146	9.0	6.3	86.8	-
	This Study	38.3890, 46.6936	13, 43, 40	252, 64, 125	10.0	6.2	32.7	80



شکل ۱۲. نتایج حاصل از حل سازوکار کانونی در این تحقیق برای زمین‌لرزه دوم اهر-ورزقان رخ داده در ۱۱ آگوست ۲۰۱۲ ساعت ۱۲:۳۴:۳۵ به وقت UTC و گزارش مراکز مختلف زلزله‌شناسی. خط سفیدرنگ شکستگی سطحی حدود ۱۲ کیلومتری مشاهده‌شده توسط فریدی و سرتیپی (۲۰۱۲) را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳. (الف) نمایش صفحه گسل با راستای ۲۵۲ درجه و شیب ۶۴ درجه که در این مطالعه به‌دست آمد برای زمین‌لرزه دوم. (ب) مقایسه نمایش صفحه گسل با استفاده از نتایج مرکز IGUT و نتایج این مطالعه. علامت ستاره در شکل نشان‌دهنده مکان کانون زمین‌لرزه (H) و محل برخورد دو صفحه، نشان‌دهنده مکان مرکزوار (C) است. صفحه‌ای که از نقاط H و C عبور کند، صفحه اصلی گسل شناخته می‌شود. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، صفحه سبز رنگ را می‌توان صفحه اصلی گسل در نظر گرفت.



شکل ۱۴. سازوکار کانونی به‌دست‌آمده برای هر دو زیر رخداد در نظر گرفته‌شده برای زمین‌لرزه دوم که با کاهش دسته داده‌ها (هر بار با حذف داده‌های مربوط به یک ایستگاه)، از پایداری خوبی برخوردار نیستند.

جدول ۷. مقایسه نتایج مرکزوار به‌دست‌آمده در این پژوهش و گزارش‌های مختلف مربوط به پس‌لرزه‌های مورد مطالعه.

Date and Time(UTC)	Agency	Lat, Lon (°)	Frequency (Hz)	Str1, Dip1, Rak1 (°)	Str2, Dip2, Rak2 (°)	Centroid Depth (km)	Time Shift (sec)	Mw	DC %	Var. Red. %	Foc. Mech.
2012/08/14	IGUT	38.4459, 46.8787	0.04-0.07	92, 83, -176	1, 86, -7	10	3.03	5.1	65.8	-	
14:02:25	This Study	38.4630, 46.7671	0.035-0.075	88, 77, -160	353, 71, -14	12	3	5	53	74	
2012/08/15	CMT	38.3900, 46.7100	-	246, 50, 133	10, 56, 51	13.2	4.2	5	-	-	
	IGUT	38.4220, 46.7160	0.05-0.08	269, 82, -174	178, 87, -8	6	2.67	5	51	-	
	This Study	38.3850, 46.6410	0.025-0.065	209, 50, 75	51, 42, 107	7	0.4	5	56.5	72	
2012/11/07	CMT	38.4000, 46.6100	-	183, 83, 7	92, 83, 173	15	0.5	5.6	-	-	
	IGUT	38.4240, 46.6160	0.025-0.075	272, 75, -173	181, 84, -15	7	1.76	5.7	77.4	-	
	This Study	38.453, 46.570	0.03-0.08	179, 58, -9	273, 82, -148	3	2.4	5.5	64.6	60	

برای بررسی پس‌لرزه‌های مورد نظر، تمام مراحل که برای دو زمین‌لرزه اصلی ذکر شد، تکرار شد. بازه فرکانسی استفاده‌شده در وارون‌سازی و نتایج به‌دست‌آمده از حل سازوکار کانونی پس‌لرزه‌ها در این پژوهش و مراکز مختلف در جدول ۷ درج شده‌اند. سازوکار کانونی به‌دست‌آمده در این پژوهش، امتدادلغز برای پس‌لرزه‌های رخ داده در تاریخ‌های ۲۰۱۲/۰۸/۱۴ و ۲۰۱۲/۱۱/۰۷ و معکوس با مؤلفه امتدادلغز برای پس‌لرزه رخ داده در تاریخ ۲۰۱۲/۰۸/۱۵ است که با سازوکار به‌دست‌آمده از پروژه جهانی CMT هم‌خوانی خوبی دارد.

۴. نتیجه‌گیری

منطقه مورد مطالعه در شمال غرب ایران واقع است. با

برای بررسی پس‌لرزه‌های مورد نظر، تمام مراحل که برای دو زمین‌لرزه اصلی ذکر شد، تکرار شد. بازه فرکانسی استفاده‌شده در وارون‌سازی و نتایج به‌دست‌آمده از حل سازوکار کانونی پس‌لرزه‌ها در این پژوهش و مراکز مختلف در جدول ۷ درج شده‌اند. سازوکار کانونی به‌دست‌آمده در این پژوهش، امتدادلغز برای پس‌لرزه‌های رخ داده در تاریخ‌های ۲۰۱۲/۰۸/۱۴ و ۲۰۱۲/۱۱/۰۷ و معکوس با مؤلفه امتدادلغز برای پس‌لرزه رخ داده در تاریخ ۲۰۱۲/۰۸/۱۵ است که با سازوکار به‌دست‌آمده از پروژه جهانی CMT هم‌خوانی خوبی دارد.

همچنین توجه به مکان دو زیرخداد زمین‌لرزه اول نشان می‌دهد که جهت شکست از شرق به غرب بوده است. گسل جنوب اهر تا قبل از رویداد این زمین‌لرزه‌ها، به دلیل نداشتن فعالیت لرزه‌ای برجسته، به‌طور کامل شناخته‌شده نبود. با توجه به نتایج تعیین صفحه اصلی گسل برای دو زمین‌لرزه اصلی، می‌توان گفت که دو گسل مجزا با شیب‌های ۸۹ درجه به سمت جنوب و ۶۴ درجه به سمت شمال به‌ترتیب مسبب زمین‌لرزه‌های اول و دوم اهر - ورزقان هستند. این دو گسل به‌ترتیب دارای راستاهای ۸۵ و ۲۵۲ درجه و هر دو دارای راستای تقریباً شرقی-غربی هستند. تشخیص اینکه زمین‌لرزه دوم مرتبط با گسیختگی سطحی است یا نه، با اطلاعات استفاده‌شده و دقت نتایج، مشکل است. همچنین تقریباً شکستگی‌های سطحی با راستای شرقی-غربی گزارش شده است.

مراجع

- Delouis, B. and Legrand, D., 1999, Focal mechanism determination and identification of the fault plane of earthquakes using only one or two near-source seismic recordings, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 89, 1, 558-1, 574.
- Donner, S., Ghods, A., Kruger, F., Robler, D., Landgraf, A. and Ballato, B., 2015, The Ahar-Varzaghan earthquake Doublet (Mw 6.4 and 6.2) of 11 August 2012: regional seismic moment tensors and a seismotectonic Interpretation, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 105, 2a.
- Faridi, M. and Sartipi, A., 2012, Ahar-Varzghan earthquake (11 August 2012) report, Geological Survey of Iran, NW regional office, Tabriz.
- Jackson, J. 1992, Partitioning of strike-slip and convergent motion between Eurasia and Arabia in eastern Turkey and the Caucasus, *Journal of Geophysical Research, Solid Earth* (1978-2012), 97(B9), 12471-12479.
- Kao, H. and Shan, S.-J., 2007, Rapid identification of earthquake rupture plane using source-scanning algorithm, *Geophys. J. Int.*, 168(3), 1011-1020.
- Lay, Th. and Wallace, T., 1995, *Modern global seismology*, Academic Pres.
- Lienert, B. R. E. and Havskov, J., 1995, A computer program for locating earthquakes both locally and globally, *Seism. Res. Let.*, 66, 26-36.

وجود فعالیت لرزه‌ای شدید در منطقه شمال‌غرب ایران، در این منطقه تا پیش از رخداد زمین‌لرزه‌های ۲۱ مرداد ۱۳۹۱، زمین‌لرزه نسبتاً بزرگی ثبت نشده بود. مهم‌ترین هدف در این پژوهش تعیین صفحه اصلی گسل مسبب زمین‌لرزه‌های متوالی رخ داده در نزدیکی اهر و ورزقان است. به منظور تعیین صفحه اصلی گسل، ابتدا با استفاده از وارون‌سازی تانسور ممان لرزه‌ای و با به‌کارگیری شکل کامل موج به مدل‌سازی پرداختیم. سپس با استفاده از روش هندسی H-C، گسل مسبب زمین‌لرزه‌های رخ داده شناسایی شد. روش H-C به عدم قطعیت مکان‌یابی H و C در تعیین صفحه اصلی گسل بسیار حساس است. در این مطالعه سعی شد با استفاده از چندین مدل سرعتی و استفاده از ایستگاه‌های نزدیک به محل وقوع زمین‌لرزه و پوشش آزمون‌ی مناسب، مکان دقیقی از کانون و مرکزوار به‌دست آید.

به منظور دستیابی به نتایج دقیق، حل تانسور ممان به روش سه‌بعدی صورت گرفت. ابتدا شبکه‌ای عمودی که از مکان کانون زمین‌لرزه می‌گذرد، در نظر گرفته شد. بعد از تعیین عمق بهینه، در چندین عمق مختلف دوباره شبکه‌هایی افقی در نظر گرفته شد. برای دستیابی به عمق بهینه مرکزوار، شبکه‌ای عمودی از مکان بهینه مرکزوار عبور داده شد. بعد از تعیین دقیق عمق مرکزوار، چشمه‌ای افقی و با فواصل نزدیک برای تعیین بهترین مکان مرکزوار در نظر گرفته شد.

در بررسی دو زمین‌لرزه و سه پس‌لرزه با بزرگی گشتاوری بزرگ‌تر از ۵، سازوکار غالب امتدادلغز راستگرد تعیین شد که با سازوکارهای به‌دست‌آمده از مراکز جهانی CMT و USGS هم‌خوانی خوبی دارد. دو زمین‌لرزه اصلی برای بررسی پیچیدگی، بیشتر مطالعه شدند. نتایج، در نظر گرفتن دو زیرخداد برای زمین‌لرزه اول را که در ۲۱ مرداد ۱۳۹۱ ساعت ۱۲:۲۳:۱۵ به وقت UTC رخ داده است، تأیید می‌کند.

با توجه به نتایج، می‌توان گفت که گسل جنوب اهر مسبب زمین‌لرزه‌های متوالی و پس‌لرزه‌های آن است.

- Lienert, B. R. E., Berg, E. and Frazer, L. N., 1986, Hypocenter: an earthquake location method using centered, scaled, and adaptively least squares, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 76, 771-783.
- Moradi, A., Hatzfeld, D. and Tatar, M., 2011, Microseismicity and seismotectonics of North Tabriz fault (Iran), *Tectonophysics*, 506, 22-30.
- Roumelioti, Z., Benetatos, Ch., Kiratzi, A., Stavrakakis, G. and Melis, N., 2004, A study of the 2 December 2002 (M 5.5) vartholomio (western Peloponnese, Greece) earthquake and of its Largest aftershocks. *Tectonophysics*, 387, 65-79.
- Vernant, Ph., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M. R., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Bayer, R., Tavakoli, F. and Chery, J., 2004, Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman. *Geophys*, 157, 381-398.
- Zahradnik, J., Gallovic, F., Sokos, E., Serpetsidaki, A. and Tselentis, A., 2008, Quick Fault plane Identification by a Geometrical Method: Application to the Mw 6.2 Leonidio Earthquake, 6 January 2008, Greece. *Seismological Reaserch Letters.*, 79, 653-662.